

リーン二相系ステンレス鋼板の終局圧縮強度 に及ぼす応力-ひずみ曲線の影響

三好 崇夫*

Effect of Stress-Strain Curve on Ultimate Compressive Strength of Lean Duplex Stainless Steel Plates

Takao MIYOSHI

ABSTRACT

Austenitic stainless steel (JIS SUS304) which is most commonly used in structural applications typically contains around 8-10% nickel. It has a relatively high initial material cost due to high cost of nickel. Recently developed lean duplex stainless steel (JIS SUS821L1) contains approximately 1.5% nickel. Low nickel content of SUS821L1 makes it more economical. Despite the low nickel content, it exhibits similar corrosion resistance to austenitic stainless steel. Therefore, it contributes to reduce life cycle cost including the initial construction cost and to extend service life of infrastructures. According to existing coupon test results, it is shown that SUS821L1 plate exhibits different stress-strain curve depending on rolling direction and tension-compression loading. However, from the view point of practical design, it is recommended to consider SUS821L1 as an isotropic material. This study aims to investigate the effect of stress-strain curve on the ultimate compressive strength of SUS821L1 internal and outstanding plate elements by means of parametric studies. Moreover, the effect of residual stress on the strength and applicability of existing design curves are assessed.

KEY WORDS: lean duplex stainless steel, stress-strain curve, ultimate compressive strength

1. はじめに

土木構造物のLCC削減に向けた一方策として、耐食性に優れたステンレス鋼の活用が考えられる。一般的なオーステナイト系ステンレス鋼SUS304等のNi含有量は8~10%であり、その材料コストを吊り上げる要因となっている。しかし、近年、Ni含有量を最少1.5%まで削減し、材料コストの削減を図りながらも、SUS304と同等の耐食性を有する、リーン二相系ステンレス鋼が開発された¹⁾。わが国では、同鋼は2015年9月に

SUS821L1としてJIS G 4304に追加されたばかりであり、土木構造物への活用が期待されている。

SUS821L1鋼板に対する材料試験²⁾によれば、同鋼の応力-ひずみ曲線や材料特性値には圧延方向による異方性、引張/圧縮載荷による若干の非対称性を示すことが明らかにされている。既往の二相系ステンレス鋼(S31803)板の終局強度解析³⁾では、同鋼の異方性や非対称性を考慮するため、Hillの降伏関数が用いられているが、その材料定数の同定には多種類の材料試験が必要であり、von Misesの降伏関数を用いた場合に比

*都市システム工学科

べて解析は不安定となる. SUS821L1 溶接鋼構造物の設計基準の策定や解析に際しては, 解析や設計上の煩雑さを避ける観点からも, 既存の設計基準⁴⁾や終局強度解析⁵⁾と同様に, 等方性材料として安全側に強度評価可能な応力-ひずみ曲線や材料特性値を用いるのが実用的と考えられる. しかし, それに際して, 各応力-ひずみ曲線が SUS821L1 鋼板の終局圧縮強度特性に及ぼす影響については明確にされていない.

本研究では, 各方向の引張, 圧縮試験から材料定数を同定した構成式を用いてパラメトリックスタディを実施し, それらの相違が純圧縮を受ける SUS821L1 周辺単純支持板と自由突出板の終局強度特性に及ぼす影響と既存の設計基準に与えられている強度曲線の適合性について明確にすることを目的とする.

2. SUS821L1 鋼板の材料特性と構成式

既往の研究^{2), 6)}では, 公称板厚 6mm の SUS821L1 熱間圧延鋼板を用いて, 圧延方向引張 (以下, LT) 試験, 同圧縮 (以下, LC) 試験, 圧延直角方向引張 (以下, TT) 試験, 同方向圧縮 (以下, TC) 試験が実施されるとともに, MRO 曲線と称する構成式の適用性が検討されている. 本章ではその概要を示す.

2-1 応力-ひずみ曲線と材料特性値

各試験から得られた代表的な応力-ひずみ曲線と MRO 曲線を図-1 に示す. ただし, 同図において, 圧縮ひずみ, 応力とも絶対値を示している. 同図より, 圧延方向による異方性と, 圧延直角方向では若干の引張/圧縮の非対称性が認められる. 表-1 には, 各試験から得られた弾性係数 E , Poisson 比 ν , 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$, 引張強度 σ_u と破断伸び ϵ_f をミルシート値, 材料規格値とともに示した. 同表からも, 引張, 圧縮の別を問わず, E , $\sigma_{0.2}$ に異方性が認められる.

2-2 構成式の適用性

SUS821L1 の応力-ひずみモデルとして, MRO 曲線の適用性を検討した⁶⁾. 図-2 に示すように, 同曲線は 3 区間で構成され, 引張試験に対して次式で表される.

$$\epsilon = \begin{cases} \sigma/E & (0 \leq \sigma < \sigma_p) \\ \sigma/E + a(\sigma^{n_1} - \sigma_p^{n_1}) & (\sigma_p \leq \sigma < \sigma_{0.2}) \\ \sigma/E + b\sigma + c + d(\sigma - \sigma_{0.2})^{n_2} & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \end{cases} \quad (1)_{1-3}$$

$$a = \frac{0.002}{\sigma_{0.2}^{n_1} - \sigma_p^{n_1}}, b = \frac{0.002n_1\sigma_{0.2}^{n_1-1}}{\sigma_{0.2}^{n_1} - \sigma_p^{n_1}}, c = \epsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.2}}{E_{0.2}}, \quad (2)_{1-4}$$

$$d = \frac{1}{(\sigma_{10} - \sigma_{0.2})^{n_2}} \left(\epsilon_{10} - \epsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right)$$

ここに, ϵ : ひずみ, σ : 応力, E : 弾性係数, σ_p : 比

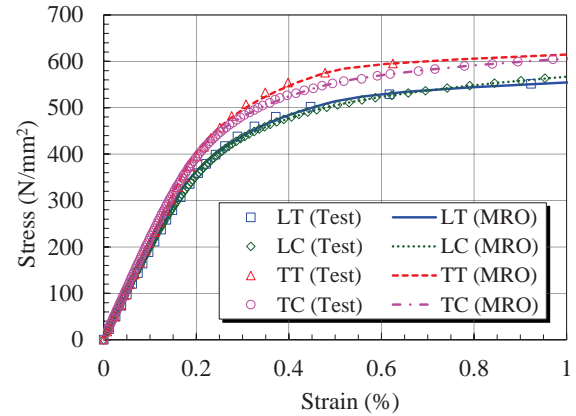


図-1 代表的な応力-ひずみ曲線

表-1 材料特性値

試験種別	E (N/mm ²)	ν	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	ϵ_f (%)
LT	192003	0.23	511	710	43
LC	194793	/	494	/	/
TT	212708	0.24	577	750	32
TC	215556	/	537	/	/
ミルシート*1	/	/	573	746	38
規格値	/	/	400	600	30

注記 *1: 圧延直角方向引張試験

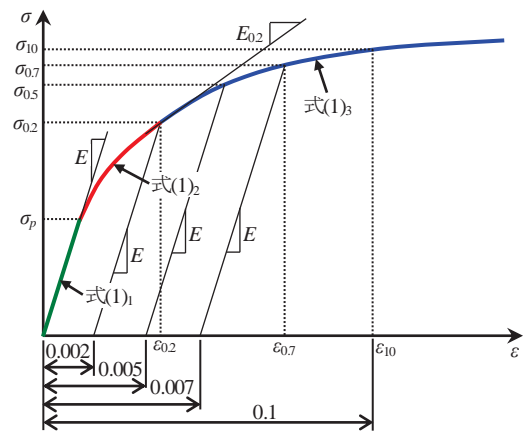


図-2 MRO 曲線の概略図

例限界 (0.01%耐力), $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力, n_1 と n_2 : それぞれ第 1 と第 2 の曲線の硬化パラメータ, $\epsilon_{0.2}$: 0.2%耐力点における全ひずみ, $E_{0.2}$: 0.2%耐力時の接線弾性係数, σ_{10} : 10%ひずみ時の応力, および ϵ_{10} : 10%ひずみ (=0.1) である.

LC, TC 試験^{2), 6)}では, 最大でも 1%程度の圧縮ひずみしか導入できていないため, 式(1)の第 3 式を適用できない. そこで, LC, TC 試験に対しては, 図-2 に示すように, $\sigma_{0.2}$ までは式(1)の第 1, 2 式を用い, それ以降は $\sigma_{0.2}$ と 0.7%耐力 $\sigma_{0.7}$ 点間の 0.5%耐力 $\sigma_{0.5}$ 点を通する曲線を用いる. 同曲線は次式で表される.

$$\varepsilon = \sigma/E + b\sigma + c + d'(\sigma - \sigma_{0.2})^{n_3} (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \quad (3)_1$$

$$d' = \frac{1}{(\sigma_{0.7} - \sigma_{0.2})^{n_3}} \left(\varepsilon_{0.7} - \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.7} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \quad (3)_2$$

各試験から同定した MRO 曲線の材料定数を表-2 に示す. 一例として, MRO 曲線を試験結果と合わせて図-1 に示す. これより, MRO 曲線は, 圧延方向, 引張・圧縮を問わず SUS821L1 の応力-ひずみ曲線を精度よく表現できることが分かる.

3. パラメトリックスタディ

パラメトリックスタディには, 8 節点シェル要素を有する非線形有限要素法解析プログラムを用いた. 同プログラムは弾塑性問題に対して von Mises の降伏関数, 連合流れ則と等方硬化則, 幾何学的非線形問題に対して更新 Lagrange 法を用いて定式化されており, 構成式には MRO 曲線が導入されている.

3.1 解析モデル

SUS821L1 周辺単純支持板, 自由突出板に対する解析モデルをそれぞれ図-3, 4 に示す. 対称性を考慮して前者は 1/4 モデル, 後者は 1/2 モデルとした. 残留応力分布は, SUS821L1 溶接 H 形断面材に関する計測結果^{2),6)}に基づいて, 同図中に示す形状を仮定した. ここで, $\sigma_{0.2}$ は解析に用いる MRO 曲線の 0.2% 耐力を用いた. 周辺単純支持板と自由突出板の初期たわみ W_s, W_o はそれぞれ次式で仮定した.

$$W_s = W_{s\max} \cos\left(\frac{\pi}{a} X\right) \cos\left(\frac{\pi}{b} Y\right) \quad (4)_1$$

$$W_o = W_{o\max} \cos\left(\frac{\pi}{a} X\right) \frac{b-Y}{b} \quad (4)_2$$

ここに, $W_{s\max}, W_{o\max}$ は初期たわみの最大値であり, 文献7)に規定されている製作精度の上限として, $W_{s\max} = b/150, W_{o\max} = b/100$ とする.

3.2 解析ケース

各試験から材料定数を同定した 4 種類の MRO 曲線に対して, 次式で表される幅厚比パラメータ λ_p を周辺単純支持板では 0.3~1.1, 自由突出板では 0.5~1.3 まで 0.2 刻みで変動させた.

$$\lambda_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_{0.2}}{k\pi^2 E}} \quad (5)$$

ここに, b : 板幅, t : 板厚, および k : 座屈係数 (自由突出板 0.425, 周辺単純支持板 4.0) である.

式(5)の弾性係数 E , 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ は各 MRO 曲線に対

表-2 MRO 曲線の材料定数

試験名称	E (GPa)	σ_p (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{0.7}$ (MPa)	σ_{10} (MPa)	n_1	n_2	n_3
LT	192	334	511	/	673	7.06	2.77	/
LC	195	323	494	566	/	7.07	/	2.15
TT	213	388	577	/	723	7.52	2.43	/
TC	216	354	537	602	/	7.18	/	2.24

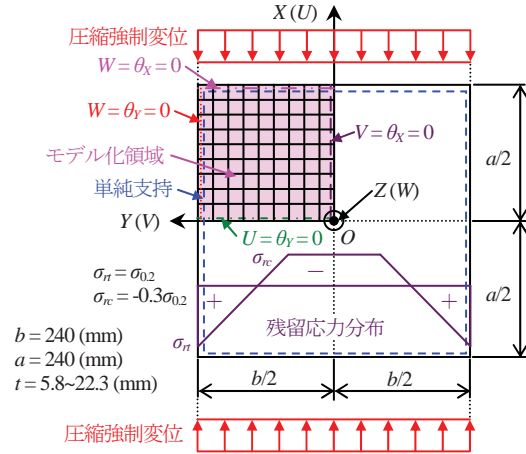


図-3 周辺単純支持板の解析モデル

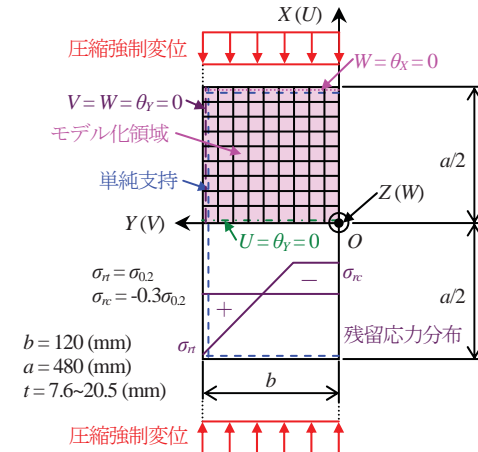


図-4 自由突出板の解析モデル

応させて表-1 に示す値を, Poisson 比 ν は圧延方向の MRO 曲線を用いる場合には LT 試験から求めた表-1 に示す値を, 同直角方向の MRO 曲線を用いる場合には TT 試験から求めた表-1 に示す値を用いた.

本研究では, さしあたり縦横比 $\alpha (a/b)$ は周辺単純支持板では 1.0, 自由突出板では 4.0 とした. 残留応力の影響についても調べるため, 残留応力を考慮しないケースも設定した.

解析ケース名は, 例えば, MRO 曲線の材料定数の同定に LT 試験を用い, $\lambda_p = 0.5$ で残留応力を考慮するケースであれば LT05R のように, MRO 曲線の材料定数の同定に用いた試験種類を表す記号の後に λ_p , さらに

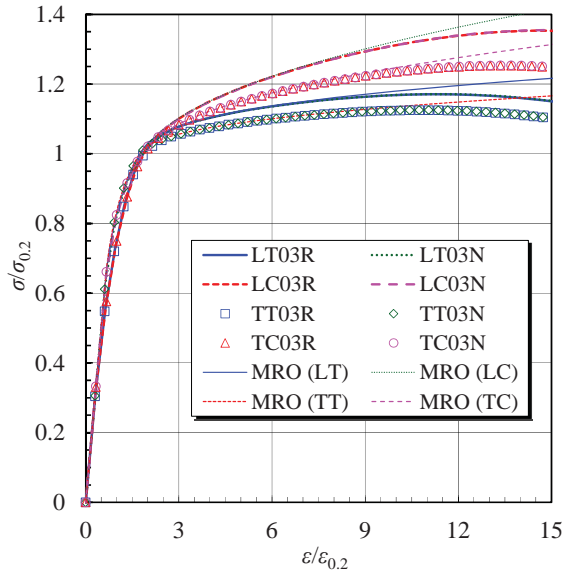


図-5 荷重-変位関係 (周辺単純支持板, $\lambda_p = 0.3$)

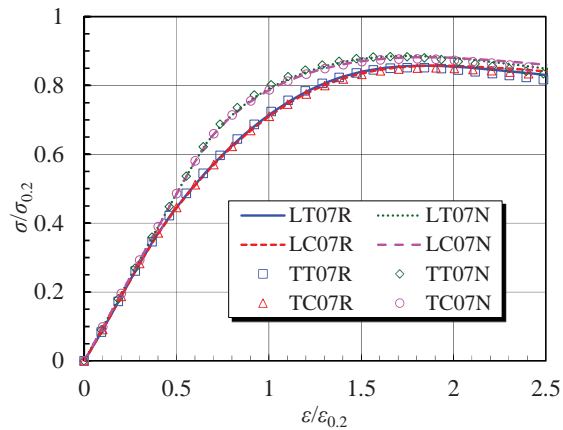


図-6 荷重-変位関係 (周辺単純支持板, $\lambda_p = 0.7$)

その後に残留応力有無の記号 (考慮しない場合は N) を付して表す。

4. 解析結果

4.1 荷重-変位関係

周辺単純支持板の一例として、 $\lambda_p = 0.3, 0.7$ のケースの荷重-変位関係をそれぞれ図-5, 6 に示す。ただし、図の縦軸は平均圧縮応力 σ を $\sigma_{0.2}$ 、横軸は平均圧縮ひずみ ε を 0.2% 耐力時の弾性ひずみ $\varepsilon_{0.2} (= \sigma_{0.2}/E)$ で無次元化している。 σ は圧縮力を載荷辺の断面積、 ε は強制圧縮変位を $a/2$ で除して求めた。さらに、図-5 には、各 MRO 曲線もあわせて示した。

図-5 より、 $\lambda_p = 0.3$ のケースはいずれも弾塑性挙動が卓越し、残留応力の影響は無視できること、最大荷重は TT 試験に基づく構成式を用いると最も低いことがわかる。一方、図-6 より、 $\lambda_p = 0.7$ のケースは、最大荷重あたりまでの挙動は残留応力の影響が大きく、

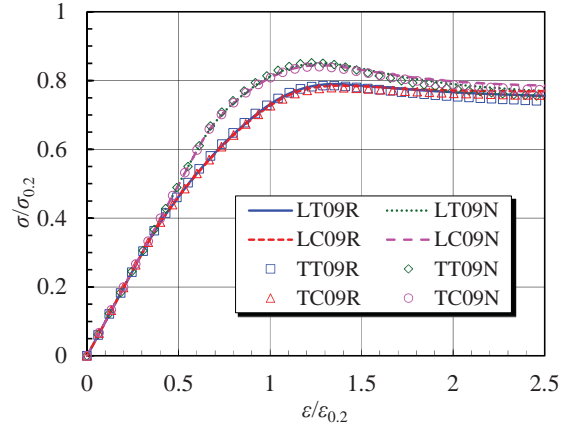


図-7 荷重-変位関係 (自由突出板)

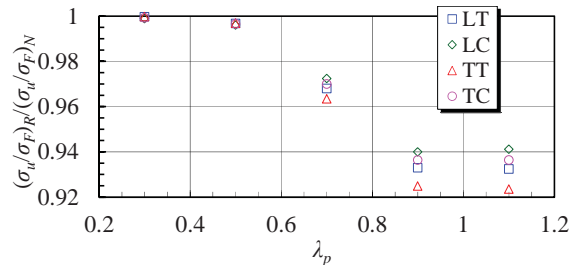


図-8 残留応力の影響 (周辺単純支持板)

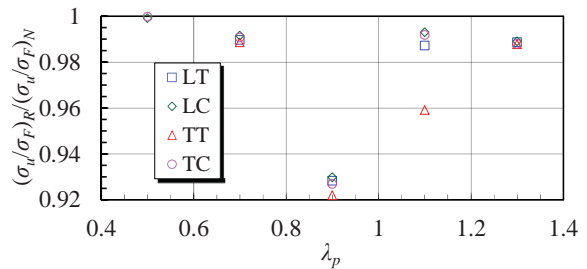


図-9 残留応力の影響 (自由突出板)

殆ど構成式の影響はないことがわかる。自由突出板の荷重-変位関係として、 $\lambda_p = 0.9$ のケースの結果を図-7 に示す。同図からも、最大荷重あたりまでの挙動は、残留応力の影響が大きく、構成式の影響は殆どないことがわかる。

4.2 終局圧縮強度

本研究では、解析による最大荷重を載荷辺の断面積で除したものを終局圧縮強度 σ_u とする。残留応力が σ_u に及ぼす影響を調べるため、残留応力を考慮した場合の σ_u を $\sigma_{0.2}$ で無次元化したパラメータ $(\sigma_u/\sigma_{0.2})_R$ と、残留応力を無視した場合の同パラメータ $(\sigma_u/\sigma_{0.2})_N$ の比を求め、 λ_p との関係として、周辺単純支持板、自由突出板についてそれぞれ図-8, 9 に示す。

図-8 より、周辺単純支持板については、 $\lambda_p = 0.7$ 以上で残留応力による強度低下が顕著となる。 $\lambda_p = 0.9, 1.1$ における強度低下はほぼ同等であり、TT 試験に基

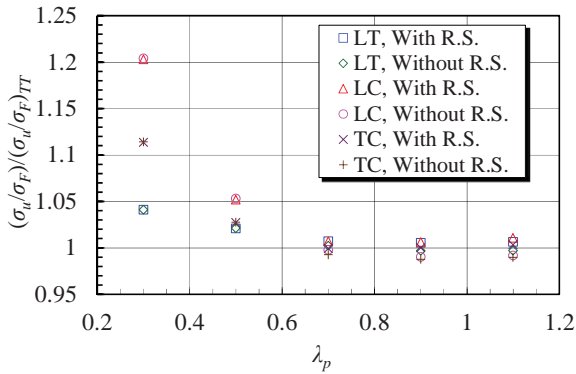


図-10 構成式の影響 (周辺単純支持板)

づく構成式を用いると、最大で8%程度の強度低下を示した。図-9より、自由突出板については、 $\lambda_p = 0.9$ では7~8%程度と特に強度低下が大きいが、 $\lambda_p = 0.7, 1.1, 1.3$ では概ね1%程度の強度低下を示した。

図-5, 8, 9によれば、TT試験に基づく構成式を用いたケースでは、全般的に終局強度が低下する傾向がみられる。構成式の相違が終局強度に及ぼす影響を調べるため、LT, LC, TC試験に基づく構成式を用いたケースの0.2%耐力による無次元化強度 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と、TT試験に基づく構成式を用いたケースの同強度 $(\sigma_u/\sigma_{0.2})_{TT}$ の比を求め、 λ_p との関係として周辺単純支持板、自由突出板についてそれぞれ図-10, 11に示した。

図-10より、周辺単純支持板については、 $\lambda_p = 0.5$ 以下ではTT試験に基づく構成式を用いたケースの終局強度が最も低いが、 $\lambda_p = 0.7$ 以上ではいずれの構成式を用いても、強度の増減は1%程度と小さく、実用上大きな影響はないように思われる。図-11より、自由突出板については、 $\lambda_p = 0.7, 0.9$ の一部はTT試験以外に基づく構成式を用いたケースの強度が低いものの、低下量は高々1%程度であり、全般的にはTT試験に基づく構成式を用いたケースの終局強度が最も小さい。よって、実用上はTT試験に基づく構成式を用いて安全側に強度が評価できると考えられる。

各構成式の接線弾性係数を弾性係数で無次元化した E_T/E と、応力を0.2%耐力で無次元化した $\sigma/\sigma_{0.2}$ の関係を図-12に示す。これより、TT試験に基づくMRO曲線の比例限界は、他のMRO曲線より若干大きい $\sigma/\sigma_{0.2} = 0.67$ であるが、0.2%耐力($\sigma/\sigma_{0.2} = 1.0$)時の E_T/E は他と有意差なく約0.15であるため、TT試験に基づくMRO曲線は、比例限界以降の接線弾性係数の低下が他に比べて急激である。さらに、0.2%耐力以降の接線弾性係数は、TT試験に基づくMRO曲線が最も小さい。TT試験に基づく構成式を用いたケースの終局強度が全般的に低いのは、接線弾性係数の低下が他に比べて大きいことによるものと考えられる。

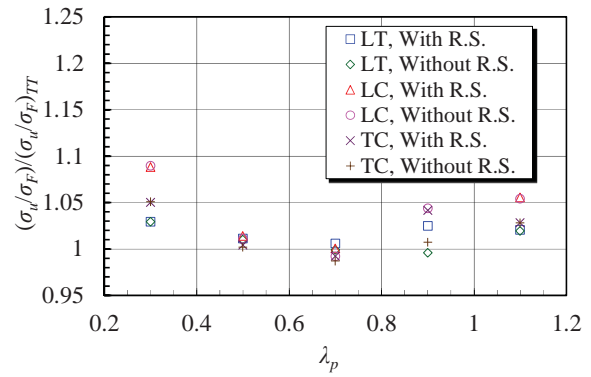


図-11 構成式の影響 (自由突出板)

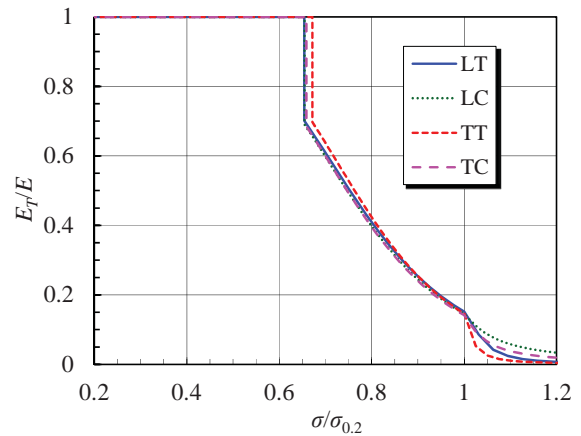


図-12 接線弾性係数と応力の関係

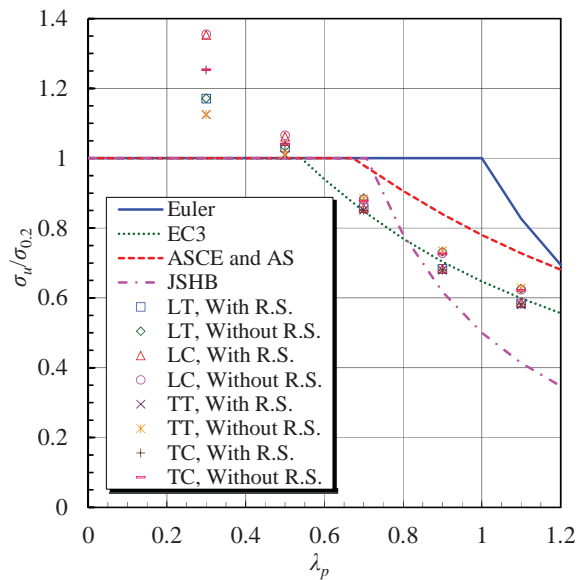


図-13 設計曲線と終局強度 (周辺単純支持板)

4・3 設計曲線と終局強度の比較

全解析ケースの無次元化強度 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と幅厚比パラメータ λ_p の関係周辺単純支持板について図-13に、自由突出板について図-14に示す。同図中には、Euler曲線、道路橋示方書⁷⁾(JSHB)の耐荷力曲線、欧州⁴⁾

(EC3), 米国⁸⁾ (ASCE), 豪州/新西蘭⁹⁾ (AS) のステンレス鋼構造物の設計基準に与えられている設計強度曲線もあわせて示した。

図-13 より, 周辺単純支持板については, EC3 の設計強度曲線との適合が良好で, JSHB の曲線は過度に安全側, ASCE と AS の曲線は危険側の強度を与える。また, 図-14 より, 自由突出板については, EC3 曲線はやや安全側, JSHB 曲線は過度に安全側の強度を与えるが, ASCE と AS の曲線は適合が最も良好である。ただし, 本検討は限られた解析結果に基づいており, リーン二相系ステンレス鋼には材料特性値の板厚依存性も認められるため¹⁰⁾, 強度曲線の提示に向けては, それらの影響や初期不整のばらつきを考慮した解析や実験結果の蓄積が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では, SUS821L1 周辺単純支持板と自由突出板の終局圧縮強度に及ぼす応力-ひずみ曲線の影響と, 既存の設計基準に与えられている強度曲線の適合性を明確にするため, 圧延, 同直角方向の引張, 圧縮試験結果から材料定数を同定した構成式を用いてパラメトリックスタディを実施した。本研究から得られた主な成果を以下にまとめる。

- (1) 周辺単純支持板, 自由突出板とも, 圧延直角方向引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を用いて全般的に安全側に終局圧縮強度が評価できる。
- (2) (1)は圧延直角方向から得られた応力-ひずみ曲線の接線弾性係数の低下が他の曲線に比べて大きいことによる。
- (3) 残留応力による強度低下は, 幅厚比パラメータ 0.7 以上の周辺単純支持板, 幅厚比パラメータ 0.9 の自由突出板で顕著である。
- (4) 周辺単純支持板の終局強度は文献 4) の設計曲線, 自由突出板の終局強度は文献 8), 9) の設計曲線との適合が良好である。

参考文献

- 1) G. Gedge : Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering, J. of Const. Steel Res., Vol.64, pp.1194-1198, 2008.
- 2) 三好崇夫 : リーン二相系ステンレス鋼溶接 I 形断面部材の残留応力, 平成 28 年度土木学会全国大会第

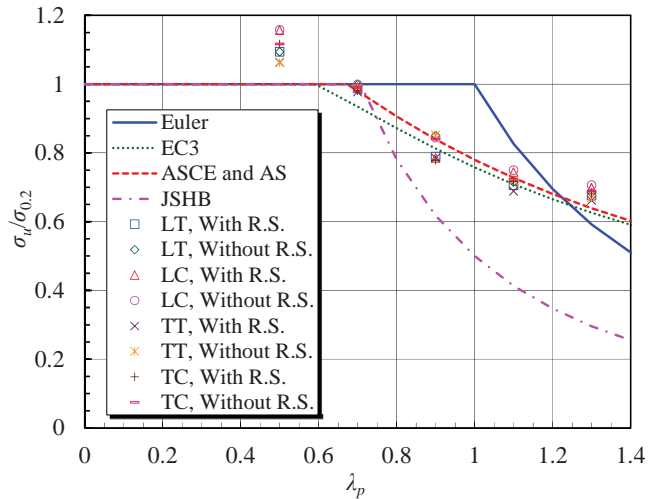


図-14 設計曲線と終局強度 (自由突出板)

71 回年次学術講演会 講演集, I-306, 2016.

- 3) K. J.R. Rasmussen, T. Burns, P. Bezkorovainy, and M. R. Bambach : Numerical modelling of stainless steel plates in compression, J. of Const. Steel Res., Vol.59, pp.1345-1362, 2003.
- 4) European Committee for Standardization : Eurocode 3: - Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels, CEN, 2006.
- 5) N. Saliba and L. Gardner : Experimental study of the shear response of lean duplex stainless steel plate girders, Eng. Struct., Vol.64, pp.375-391, 2013.
- 6) 三好崇夫 : SUS821L1 溶接 I 形断面部材の材料特性値と残留応力, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, 2016. (掲載予定)
- 7) 社団法人 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012.
- 8) ASCE : Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members, SEI/ASCE8-02 : Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2002.
- 9) AS/NZS : Cold-formed stainless steel structures, Australian/New Zealand Standard, AS/NZS 4673 : 2001, Sydney (Australia), Standards Australia, 2001.
- 10) 細見玄武, 三好崇夫 : リーン二相系ステンレス鋼板の機械的特性値と構成式, 明石工業高等専門学校研究紀要, 第 57 号, pp.15-22, 2015.